

《零碳园区硬件在环仿真测试技术要求》编制说明

（征求意见稿）

一、工作简况

1. 主要工作过程

起草（草案、调研）阶段：2026年4月成立了起草工作组；明确标准编制任务、工作分工、进度安排及编制要求。工作组召开标准编制启动会议，围绕标准的适用范围、主要技术内容、总体框架和重点问题进行了讨论。在充分收集、整理相关法律法规、政策文件、国内外标准及行业资料的基础上，工作组通过实地调研、座谈交流、专家咨询等方式，深入了解相关单位的实际需求、实施现状和存在的问题。根据调研结果，工作组对标准的主要内容进行研究论证，确定标准框架和技术路线，经多次内部讨论、修改完善，形成标准草案。

征求意见阶段：2026年4月—2026年5月，起草工作组组织召开标准草案研讨会，对标准的结构、条款内容、技术要求及可操作性进行逐项研究。工作组结合会议讨论情况和相关专家意见，对标准草案进行了修改完善，重点对适用范围、术语和定义、技术要求及实施要求等内容进行了进一步明确和规范。在充分论证并经工作组内部审核后，于2026年5月形成标准征求意见稿及其编制说明，为后续公开征求意见奠定基础。

2. 主要参加单位和起草工作组成员及其所做的工作

本标准由国网江苏省电力有限公司盐城供电分公司、东南大学、大丰隆盛实业有限公司、南京理工大学共同负责起草。

主要成员：

（1）国网江苏省电力有限公司盐城供电分公司：柏晶晶（高级）、黄海泉（高级）、郝广东（中级）、郑杨（副高级）、张勐（中级）、苏志雄（初级）、顾栩玥（初级）、丁浩（初级）、周杏宇（初级）、樊晓康（初级）、蒋宇（初级）。主要负责标准的组织和起草。

（2）东南大学：章飞（副高），沈操（研究生）。主要负责标准的调研和撰写。

(3) 大丰隆盛实业有限公司：王媛媛（高级）。主要负责标准的工程验证。

(4) 南京理工大学：柳伟（副高）、胡恺元（研究生）、刘倩竹（研究生）。主要负责标准的修改。

所做的工作：

1. 起草（草案、调研）阶段：2026 年 4 月成立了起草工作组；
2. 征求意见阶段：2026 年 4 月—2026 年 5 月，完成征求意见稿。

二、标准编制原则和主要内容

1. 标准编制原则

在编制本标准（即《零碳园区硬件在环仿真测试技术要求》）时，核心原则旨在衔接现有国家标准（GB/T 40601—2021 与 GB/T 44650—2024），并针对零碳园区多能耦合与设备接入实证的特殊需求进行演进。

2. 标准主要内容

1. 硬件在环测试系统仿真参数要求

(1) 仿真步长要求：典型电力电子设备仿真步长应小于 1 微秒，园区系统级仿真步长应小于 50 微秒；

(2) 通讯接口精度：模拟量输入/输出（AI/AO）：16 位及以上分辨率，误差小于 0.1%；数字量（DI/DO）：支持高频脉冲捕获（用于 PWM 验证），时间分辨率小于 10 纳秒；

(3) 通信协议支持：必须涵盖 Modbus TCP/RTU、IEC 61850、IEC104 等电力领域常用协议；

(4) 功率放大器的额定功率需大于被测设备的额定功率 1.5 倍。

2. 硬件在环测试系统仿真模型要求

(1) 光伏/风电等新能源设备电磁暂态模型需要具备表征内部开关状态的能力，精度与详细开关模型对比需要小于 0.5%；

(2) 电网侧模型需根据现场实测园区电力系统搭建，系统仿真模型与实测数据误差需小于 0.5%；

(3) 负荷模型需具备可调控有功和无功输入接口，支持典型负荷曲线的加载。

3. 硬件在环测试系统仿真测试内容

(1) 离网/并网切换测试：验证在电网波动或故障时，设备控制系统自动平滑切换的能力；

(2) 高电压和低电压穿越测试：验证并网设备在电网电压发生扰动时维持不脱网并提供支撑能力；

(3) 强弱电网模拟测试：通过实时仿真器模拟强弱电网（弱电网 $SCR < 1.5$ ，强电网 $SCR > 3$ ），验证控制器在不同阻抗环境下的稳定性。

3. 主要技术差异

GB/T 40601—2021 未对设备的硬件在环测试建立明确的标准，GB/T 44650—2024 仅罗列了光伏逆变器控制器硬件在环测试的流程。上述两个标准均未涉及多类型设备接入园区系统的测试与评估标准，本标准不仅面向控制器的测试，且通过功率放大器可验证真实设备与模拟不同园区电网强度的仿真器之间的交互验证。

4. 解决的主要问题

零碳园区通常包含大容量储能、氢能、分布式光伏等设备，直接在真实物理系统上进行极端工况测试（如电网频率波动、短路故障、控制系统崩溃）极易造成硬件损毁甚至安全事故。本标准规定了如何在硬件在环仿真环境下安全地模拟包含故障的各类工况，使硬件在不连接真实电网的情况下得到全面验证。

三、主要试验（或验证）情况

（1）试验验证情况

标准起草过程中，工作组依托硬件在环仿真测试平台，对标准规定的测试环境、接口配置、测试流程、测试场景、评价指标和结果判定方法进行了试验验证。验证对象涵盖园区能源管理系统、协调控制器、储能控制器、光伏及风电控制装置、充换电设施、柔性负荷控制装置等典型设备。

通过建立分布式电源、储能系统、充电设施、建筑负荷及配电网络等实时仿真模型，将实际控制器或控制装置接入实时仿真平台，开展正常运行、功率波动、负荷突变、设备启停、并离网切换、通信异常及故障扰动等场景测试。试验结果表明，标准规定的测试条件、测试步骤及评价方法具有较好的可执行性，能够对被测硬件的控制性能、响应特性、运行稳定性、通信可靠性和异常处置能力进行有效评价。

（2）工程应用情况

工作组结合零碳园区规划建设、能源系统调试及运行控制的实际需求，对标

准相关技术内容在盐城大丰港进行了工程适用性验证。重点分析了硬件在环仿真测试在园区能源管理系统上线前测试、控制策略校核、设备接入验证、运行参数优化和故障风险预判等环节的应用需求。

验证结果表明，采用本标准规定的测试方法，可以在不影响园区实际生产运行的条件下，对能源管理系统及相关控制设备开展闭环测试，提前发现控制逻辑、通信接口、参数配置和设备协同方面的问题，降低现场联调和试运行风险。本标准能够为零碳园区规划设计、设备选型、系统集成、调试验收及运行优化提供技术支撑，具有较好的工程适用性和推广价值。

（3）仿真验证情况

工作组围绕零碳园区“源—网—荷—储—充”协同运行特征，构建了包含分布式光伏、分散式风电、储能系统、充换电设施、建筑负荷、工业负荷及园区配电网络在内的仿真模型，并设置多种典型运行工况，对标准中的测试场景和技术指标进行了仿真验证。

仿真验证重点包括功率平衡控制、新能源消纳、储能充放电控制、需求响应、并离网切换、电压和频率调节、碳排放优化控制，以及设备故障和通信异常情况下的系统响应。通过对仿真结果与理论计算结果、设计参数及设备运行特性进行对比分析，验证了测试模型、场景设置、数据采集和结果评价方法的合理性。验证结果表明，标准规定的测试内容能够较为全面地反映零碳园区控制设备及系统在正常、扰动和故障工况下的运行性能。

（4）专家验证情况

在标准编制过程中，工作组组织相关领域专家对标准的技术内容进行了研讨和论证。专家范围涵盖零碳园区规划建设、新型电力系统、综合能源管理、实时数字仿真、硬件在环测试、自动控制、储能及新能源等专业领域。

专家重点对标准的适用范围、术语和定义、测试系统架构、软硬件接口、模型要求、测试场景、测试流程、评价指标及结果判定方法进行了审查。经论证，专家认为本标准技术路线总体合理，测试对象和测试内容较为明确，测试方法具有可操作性，能够满足零碳园区控制设备和能源管理系统的研发、联调及验收测试需求。工作组根据专家提出的意见，对相关条款进行了修改完善，进一步增强了标准内容的科学性、规范性和工程适用性。

四、标准中涉及专利的情况

本标准不涉及专利问题。

五、预期达到的社会效益、对产业发展的作用等情况

标准实施可促进零碳园区的仿真测试产业结构调整与优化升级，为推动零碳园区大规模落地提供关键支撑。具体作用如下。

（1）提升零碳园区测试安全水平

本标准通过规定硬件在环仿真测试系统的环境条件、系统架构、接口配置、模型要求、测试流程和安全防护要求，将部分高风险、强扰动及极端工况测试由实际园区转移至仿真环境中开展。在不影响园区实际生产和供能安全的条件下，可模拟设备故障、通信中断、功率突变、并离网切换、电压和频率异常等场景，验证被测设备的控制逻辑、保护策略和故障处置能力。

标准的实施能够降低直接开展现场试验可能造成的设备损坏、供能中断和人员安全风险，提前发现控制参数配置不当、保护配合不合理及异常处置机制不完善等问题，为零碳园区安全调试和稳定运行提供技术保障。

（2）规范设备接入和系统协同

零碳园区通常包含光伏、风电、储能、充换电设施、柔性负荷、能源管理系统及各类控制装置，不同设备在通信协议、数据格式、控制接口、时间同步和响应特性等方面存在差异。本标准通过明确被测设备接入硬件在环仿真平台的电气接口、通信接口、数据交互、信号配置和时间同步等要求，为不同类型设备提供统一的接入和测试依据。

通过开展接入前验证，可以检查设备接口兼容性、通信稳定性、数据完整性和控制指令执行能力，提前发现设备之间以及设备与园区能源管理系统之间的适配问题，减少现场联调工作量，提升“源—网—荷—储—充”等多类设备的协同控制水平。

（3）提高测试结果的一致性和可比性

针对当前不同测试机构、设备制造企业和园区建设单位在模型设置、工况选取、测试流程及结果判定等方面可能存在差异的问题，本标准统一规定硬件在环仿真测试的基本条件、模型要求、测试场景、测试步骤、数据记录和评价方法。

标准实施后，各有关单位可以按照统一方法开展测试，减少因测试环境、操作流程和评价尺度不同造成的结果差异，提高测试过程的重复性以及测试结果的一致性、可追溯性和可比性。这将为设备性能评价、产品选型、系统验收和第三方检测提供客观依据，也有利于推动测试结果在不同项目和不同机构之间的互认。

（4）支撑零碳园区工程建设和运行应用

本标准可应用于零碳园区规划设计、设备选型、系统集成、出厂测试、现场

联调、工程验收和运行优化等环节。通过在设备安装或控制系统上线前开展硬件在环闭环测试，可以对能源管理策略、新能源消纳能力、储能充放电控制、需求响应、功率平衡、并离网切换及异常工况处置等功能进行验证。

测试结果能够为控制策略优化、运行参数整定和工程方案完善提供依据，有助于缩短现场调试周期，减少重复调试和工程返工，降低项目建设及运维成本。同时，可在不扰动实际系统运行的情况下，对控制策略升级和新增设备接入方案进行预验证，提高零碳园区建设效率及运行管理水平。

（5）推动相关产业规范化发展

本标准明确了零碳园区硬件在环仿真测试的技术要求和评价规则，有助于形成覆盖设备研发、系统集成、测试验证和工程应用的规范化技术体系，引导设备制造企业按照统一要求开展产品设计、接口开发和性能验证。

标准的实施将促进仿真平台、能源管理系统、新能源控制设备、储能控制设备及检测服务等产业链上下游之间的技术衔接，减少因技术要求不统一造成的重复开发和市场壁垒，提升相关产品的质量和互操作能力。同时，可为第三方检测、工程验收、产品认证和行业监管提供技术参考，推动零碳园区相关产品和服务由分散化、定制化向标准化、专业化和规模化方向发展。

总体来看，本标准的制定和实施有利于提升零碳园区能源系统的安全性、可靠性和协同性，降低工程实施风险与全生命周期成本，加快新能源、储能及柔性负荷等资源的高效利用，对支撑园区绿色低碳转型、促进“双碳”目标实现具有积极作用。

六、与国际、国外对比情况

（1）没有采用国际、国外标准。

（2）IEEE 1547.1 侧重于分布式能源与电网接口的互操作性测试规范，IEC 62909 涉及双向功率转换器，但未对硬件在环仿真测试做出统一量化规定。

（3）没有测试国外的样品、样机。

（4）国内先进水平与上述标准相比，本标准的先进性主要体现在以下方面：

测试对象更加系统。本标准面向零碳园区整体能源系统，不仅包括分布式光伏、风电、储能和充换电设施等设备，还包括园区能源管理系统、协调控制器及柔性负荷控制装置，实现由单一设备测试向多设备、多系统协同测试拓展。

测试架构更加完整。本标准以实时仿真模型与实际控制硬件构成闭环测试系统，规定测试平台、仿真模型、硬件接口、通信连接、数据采集、时间同步和测试环境等要求，形成较为完整的硬件在环仿真测试技术框架。

测试场景更加贴近工程实际。本标准覆盖正常运行、功率波动、负荷突变、设备启停、并离网切换、通信异常和故障扰动等典型场景，能够验证园区“源—网—荷—储—充”协同控制、功率平衡、新能源消纳、需求响应及异常处置能力。

测试要求更量化统一。本标准围绕模型精度、平台实时性、通信与接口性能、数据采集、控制响应、稳态误差、动态特性和测试重复性等内容提出统一要求，明确测试步骤、数据处理和结果判定方法，有助于减少不同测试机构、设备制造商及工程项目之间的测试差异，提高结果的一致性、可比性和可追溯性。

工程应用链条更加完整。本标准可用于设备研发、产品出厂测试、设备接入验证、系统集成、现场联调、工程验收和运行策略升级验证，能够在不影响园区实际运行的情况下发现接口不匹配、参数配置不合理和控制策略不协调等问题，降低现场试验风险和工程实施成本。

综上，本标准并非对 IEEE 1547.1 或 IEC 62909 相关技术内容的简单替代，而是在吸收分布式能源并网测试、功率变换器接口测试等技术理念的基础上，结合我国零碳园区多能源协同运行和工程建设需求，构建了面向园区级硬件在环仿真测试的系统化技术要求。其在测试对象覆盖范围、测试系统完整性、场景设置、量化评价和工程适用性等方面具有明显特点，补充完善了国内零碳园区测试标准体系，可认为总体达到国内先进水平。

七、在标准体系中的位置，与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的协调性

本标准不规定零碳园区的认定、碳排放核算、规划设计和建设评价要求，也不改变各类电力设备已有的产品安全、并网性能和现场验收要求，而是对设备接入园区能源系统后的闭环运行和协同控制能力提供统一的仿真测试方法。本标准仅规定技术测试要求，不涉及行政许可、市场准入、电力调度权限、并网审批和监管职责，不改变有关主体依法承担的安全生产、网络安全、数据安全及电力可靠供应责任，与现行法律、法规和部门规章不存在冲突。本标准未另行设置低于强制性标准的安全技术要求，测试活动涉及电力系统运行、电气设备操作或实验室带电作业时，相关强制性标准具有优先约束作用。

与现有标准不存在替代或交叉矛盾关系。GB/T 40601 解决“实时数字仿真系统应具备什么通用能力”的问题，本标准解决“如何利用实时仿真平台对零碳园区实际硬件及协同控制系统进行测试”的问题。涉及实时数字仿真的通用技术内容执行 GB/T 40601，本标准不重复规定或降低其要求。

综上，本标准与现行法律、法规、部门规章及强制性标准不存在抵触，与

GB/T 40601、GB/T 44650 及相关电力、并网和测试标准分工明确、相互衔接。本标准补充了现有标准在零碳园区多类型硬件统一接入、闭环仿真、系统协同和复杂场景量化测试方面的不足，能够与现行标准共同构成较为完整的零碳园区测试验证技术体系。

八、重大分歧意见的处理经过和依据

本标准在起草和研讨过程中，暂未出现重大技术分歧意见。

九、标准性质的建议说明

建议本标准的性质为推荐性团体标准。本标准建议定位为自愿采用的团体标准，不建议定位为强制性标准。本标准供零碳园区建设单位、设备制造企业、系统集成单位、检测机构和科研单位在硬件在环仿真测试活动中采用。待标准经过一定范围的工程应用和实施验证后，可根据行业发展和标准体系建设需要，研究转化为行业标准或推荐性国家标准。

十、贯彻标准的要求和措施建议

建议本标准批准发布 2 天后实施。

十一、废止现行相关标准的建议

本文件为新制定标准，不涉及废止现行相关标准。

十二、其他应予说明的事项

无。